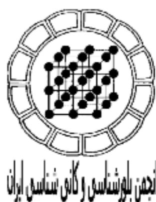
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی‌ام، شمارهٔ دوم، تابستان ۱۴۰۱، از صفحهٔ ۲۹۵ تا ۳۱۰



کانی‌شناسی و زمین‌شیمی گارنت‌های چند خاستگاهی در گارنت شیست‌های منطقه انجیرخواجه-سیرجان (جنوب شرق ایران) بر پایه بررسی طیف‌سنجی ریز رامان

حدیثه رحیمی صادق، حسام الدین معین زاده*، بهرام بهرام بیگی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲۰، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۸/۱۵)

چکیده: منطقه انجیرخواجه در بخش جنوبی پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان در شمال غربی معدن آهن گل گهر واقع شده است. واحدهای سنگی منطقه متابازیت، متاسدیمنت، سنگ‌های آذرین و رسوبی هستند. متاسدیمنت‌ها شامل میکا شیست، گارنت شیست و گارنت- استارولیت شیست هستند که در رخساره‌های شیست‌سبز و آمفیبولیت دگرگون شده‌اند. گارنت فراوان‌ترین شکفته بلور در متاسدیمنت‌هاست که به صورت نیمه شکل‌دار تا ناخودشکل با اندازه‌های متوسط تا درشت حضور دارد. نتایج ریزپردازش الکترونی نشانگر محلول جامد گارنت‌ها با بالاترین درصد در نوع آلماندین است. بر اساس بررسی‌های ریزساختاری، سه نسل از گارنت‌ها با ویژگی‌های شیمیایی و طیفی رامان متفاوت تشخیص داده شدند. این سه نسل شامل گارنت‌های غنی از آلماندین، غنی از گروسولار و غنی از پیروپ هستند که از نظر سنگ‌نگاری، شیمی کانی و طیف‌سنجی رامان بررسی و رده‌بندی شدند. گارنت غنی از آلماندین با مقدار آهن بیشتر و ارتعاش‌های با عدد موج کمتر از $۳۲۰cm^{-1}$، گارنت غنی از گروسولار با آهن به نسبت کم و مقدار کلسیم بیشتر و بیشترین عدد موج بین ۴۰۰ تا $۶۵۰cm^{-1}$ و گارنت غنی از پیروپ با منیزیم بیشتر و مقدار آهن کم و عدد موج بیش از $۸۰۰cm^{-1}$ دیده می‌شوند. بررسی سنگ‌زایی گارنت شیست‌های منطقه انجیرخواجه نشانگر سنگ مادر شیلی و ماسه سنگی برای آنهاست که در یک جایگاه جزایر کمانی قاره‌ای نهشته شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: *گارنت شیست؛ شیمی کانی؛ طیف سنجی رامان؛ پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان.*

مقدمه

پیشینه

گروه کانی‌های گارنت در طیف گسترده ای از سنگ‌های آذرین و دگرگونی در گستره‌ی وسیعی از فشار و دما وجود دارند. فرمول استاندارد گارنت در حالت آرمانی $X_3^{2+}Y_2^{3+}(SiO_4)_3$ است. دو مجموعه شامل شش کانی رایج در گروه گارنت‌ها وجود دارد. در مجموعه پیرال اسپیت $Y = Al$ و $X = Mg$، Fe^{2+}، Mn (شامل کانی‌های پیروپ $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$، آلماندین $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$ و اسپسارتین $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$) و در مجموعه اوگراندیت $X = Ca$ و $Y = Cr, Al, Fe^{3+}$، (شامل کانی‌های اووارویت $Ca_3Cr_2Si_3O_{12}$، گروسولار $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$، آندرادیت $Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$) است [۱].

شناسایی ترکیب شیمیایی گارنت‌ها بسیار مورد توجه است، زیرا گارنت‌ها به طور گسترده در بسیاری از سنگ‌ها و رسوب‌ها پراکنده هستند. گارنت‌ها به طور کلی به صورت محلول جامدی از کانی‌ها یافت می‌شوند و به صورت اعضای پایانی خالص کمیاب هستند که به محیط‌های ویژه زمین‌شناسی محدود می‌شوند [۲، ۳].

برای شناسایی کانی گارنت در گارنت شیست‌های شمال غربی معدن آهن گل گهر در پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان، بررسی ریزپردازش الکترونی به همراه طیف سنجی رامان انجام شده است. این پژوهش، نتایج این بررسی‌ها را ارائه می‌دهد.

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۱۴۱۴۱۰۳ ، نمابر: ۰۳۴۳۳۲۵۷۴۳۵، پست الکترونیکی: hmoeinadeh@uk.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.8.4]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.295]

طیف سنجی رامان و ریزپردازش الکترونی رویکرد امیدبخشی برای درک ویژگی‌های انتشار کاتیون برای گارنت‌ها طی دگرگونی را ارائه می دهند و یک روش مناسبی برای تفکیک کانی‌ها با ساختار ویا ترکیب شیمیایی مشابه هستند.

این پژوهش، سه هدف کلی خلاقانه داشت؛ ۱) برای نخستین بار، ویژگی‌های شیمی و شیمی‌کانی کانی‌های سنگ-ساز در سنگ‌های گارنت شیست از بخش جنوبی پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان در شمال غربی معدن آهن گل گهر شناسایی شد. ۲) توابع تجربی بین ویژگی‌های کانی شناسی و شیمیایی و الگوهای طیفی رامان از هر نوع گارنت معرفی شده در منطقه بررسی کردید. ۳) انواع سنگ‌ها و تکامل گارنت شیست‌ها برای درک زمین پویایی منطقه مورد بررسی تعیین شد.

زمین شناسی منطقه

فلات قاره‌ای ایران در بخش مرکزی کمربند کوهزایی آلپ-هیمالیا بین صفحه عربستان و اروپا واقع است که به چند واحد زمین ساختی اصلی تقسیم می‌شود؛ این منطقه با تاریخچه ساختاری متنوع و گسترش یافته از مراحل پیچیده صفحه‌های زمین‌ساختی که در اوایل پروتروزوئیک و در ترشیری تکامل یافته‌اند، شناخته می‌شود [۴-۷]. سه واحد برجسته با روند شمال غرب-جنوب شرق (NW-SE) عبارتند از کمربند چین خورده و روراندگی زاگرس، پهنه سنندج- سیرجان و مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر که به عنوان کمربند کوهزایی زاگرس شناخته می‌شود [۸-۱۲]. کمربند کوهزایی زاگرس و فلات قاره‌ای ایران تاریخچه همگرایی دارند که با مراحل فرورانش و بالارفتن صفحه‌ها آغاز شده و با برخورد دو صفحه به پایان می-رسد.

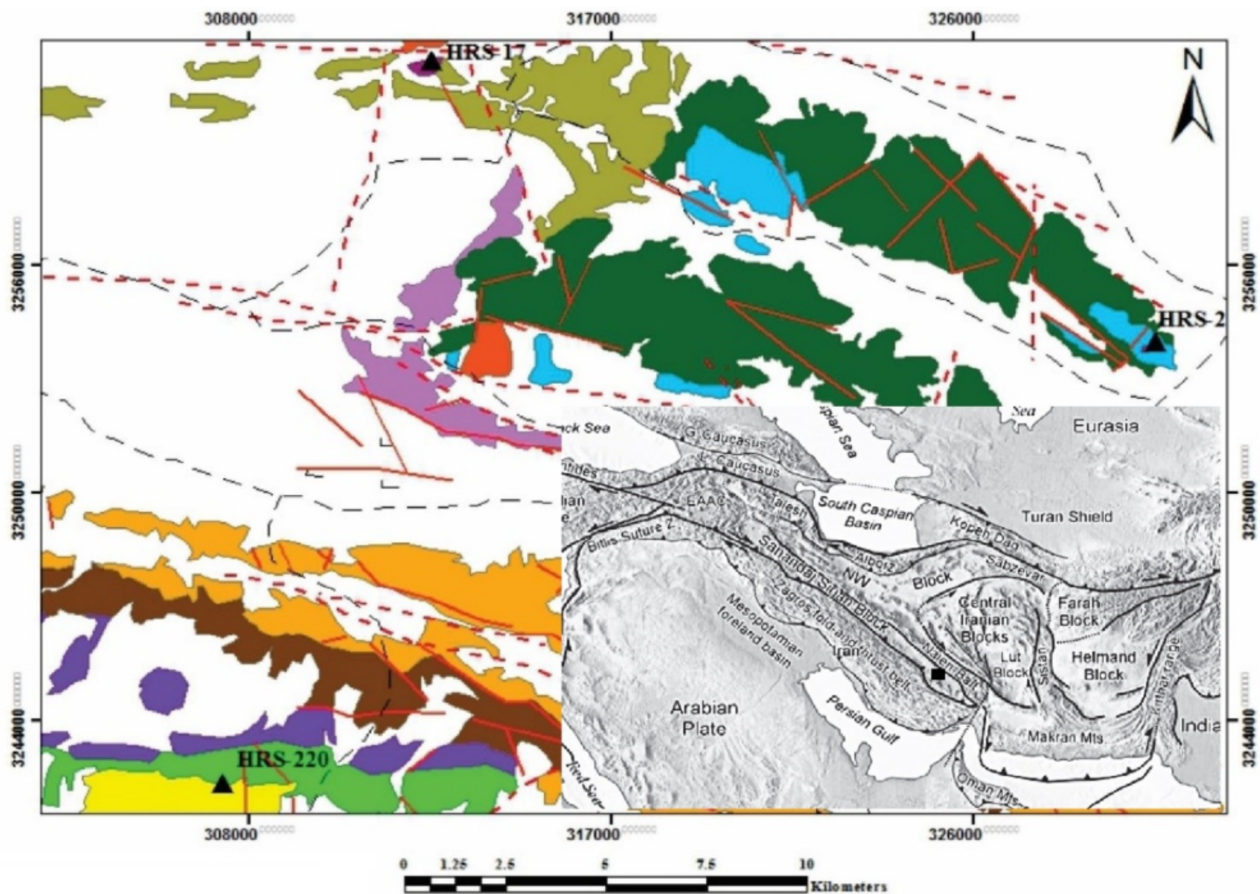
پهنه سنندج-سیرجان با یک روند شمال غربی-جنوب شرقی با پهنای بیش از ۲۰۰ کیلومتر و طول ۱۶۰۰ کیلومتر در بخشی از فلات قاره ایران گسترش دارد. این پهنه بین کمربند روراندگی و چین خورده زاگرس در جنوب و جنوب غربی و مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر در شمال و شمال شرقی قرار دارد. فرورانش اقیانوس نئوتتیس بین صفحه‌های آفریقایی-عربی و ایرانی و سپس برخورد قاره‌ای در دوره کرتاسه تا اوایل ترشیری باعث دگرگونی و فعالیت ماگمایی در پهنه سنندج-سیرجان شده‌است [۱۳-۱۵]. پهنه سنندج-سیرجان شامل انواع مختلف سنگ‌های رسوبی-آتشفشانی و سنگ‌های دگرگونی از انواع باروین و ابوکاما با سنین پالئوزوئیک و مزوزوئیک است [۴، ۶، ۷، ۱۶، ۱۷].

منطقه انجیرخواجه در عرض جغرافیایی ′۱۲°۲۹ و ′۲۸°۲۹ شمالی و طول جغرافیایی ′۱۸°۵۴ و ′۵۰°۵۵ شرقی، با مساحت ۳۰ کیلومتر مربع در۵۰ کیلومتری شمال غربی معدن گل گهر و غرب منطقه خیرآباد، شهر سیرجان، در جنوب شرقی پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان واقع است. سنگ‌های دگرگونی منطقه شامل مجموعه‌ای از سنگ‌هایی با خاستگاه آذرین و رسوبی هستند. سنگ‌های منطقه مورد بررسی به صورت ناحیه‌ای دگرگون شدند و در نتیجه انواع مختلفی از گارنت شیست‌ها، آمفیبولیت‌ها، پاراگنیس‌ها، متابازیت‌ها و متاکربنات‌ها ایجاد شده‌اند [۱۸] (شکل ۱).

این سنگ‌ها در رخساره شیست‌سبز تا رخساره آمفیبولیت دگرگون شده‌اند [۱۹] و از نظر سنی مربوط به پروتروزوئیک تا مزوزوئیک هستند [۲۰]. سنگ‌های گارنت شیست به صورت لایه‌ای در میان سنگ‌های کناری با ضخامت تا ۵ متر، روند کلی N50E و شیب 35NW تشکیل شده‌اند. همه سنگ‌ها با گسل‌های اغلب با روند NW-SE و N-S جابجا شده‌اند و بررسی روابط چینه‌شناسی اصلی آنها دشوار است. گارنت شیست‌ها و گارنت استارولیت شیست‌ها در این پژوهش برای تشخیص انواع گارنت‌ها با ریزپردازش الکترونی همراه با طیف سنجی رامان و همچنین برای تعیین شرایط دگرگونی، بررسی شدند.

گارنت‌های مورد بررسی از دو زیرواحد متفاوت هستند [۱۸]: (۱) گارنت شیست‌ها (HRS-2 وHRS-17) در دو بخش از شمال و شرق منطقه مورد بررسی در زیر واحد با سن تریاس قرار دارند [۱۹]. این سنگ‌ها براق با رنگ خاکستری هستند و در میان واحدهای متابازالت، مرمر، کوارتزیت، سنگ آهک و دولومیت دگرگون شده با ضخامت۱۰ سانتی متر در منطقه رخنمون دارند. سنگ‌ها در اثر فعالیت زمین‌ساختی خرد شده-اند و به این دلیل، شیستوارگی در نمونه دستی دیده نمی‌شوند (شکل‌های ۲ الف و ب). (۲) گارنت-استارولیت شیست (HRS-220) در جنوب و در قدیمی‌ترین سنگ‌های زیرواحد منطقه مورد بررسی همراه با اسلیت، فیلیت، شیست سبز و

آمفیبولیت‌های با سن پالئوزوئیک پیشین با ضخامت یک متر قرار دارند [۱۹]. این سنگ‌ها براق هستند و به علت جهت‌یابی کانی‌های بیوتیت و مسکوویت در سنگ، شیستوارگی ایجاد شده است. گارنت‌ها بسیار ریز هستند و با چشم غیر مسلح دیده نمی‌شوند. میزان دگرگونی در این واحد از سایر واحدها بیشتر است (شکل ۲پ).



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه واحدهای ساختاری ایران و نقشه زمین شناسی منطقه انجیرخواجه سیرجان، به همراه موقعیت نمونه های گارنت شیست.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.8.4]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.295]



شکل ۲ الف) مشخصات میدانی گارنت شیست (HRS-2)، ب) تصویر صحرایی گارنت شیست (HRS-17)، پ) رخنمون گارنت-استارولیت شیست (HRS-220) در منطقه.

روش بررسی

در بررسی‌های میدانی، بیش از ۳۰۰ نمونه از انواع سنگ‌های مختلف منطقه جمع آوری شد. ۳ مقطع نازک از نمونه‌های گارنت تهیه گردید و نمونه‌های بررسی شده (HRS-2،HRS-17 و HRS-220) با کمترین تغییر (کمترین تغییر پلاژیوکلاز به کانی‌های رسی) برای تجزیه به روش ریزپردازش الکترونی و طیف سنجی رامان انتخاب شدند.

تجزیه شیمیایی کانی‌ها بر روی مقاطع نازک صیقلی با ریزپردازشگر الکترونی (EPMA) مدل JEOL JXA-8900 در آزمایشگاه EMS دانشگاه یاماگاتا در ژاپن با ولتاژ شتاب دهی ۱۵ کیلوولت، جریان پرتو ۲۰ نانومتر، قطر پرتو حدود ۵ ریزمتر، حد تشخیص ۰٫۰۵ درصد وزنی و فاصله شمارش تا ۴۰ ثانیه انجام شد. داده‌ها با استفاده از اکسید ZAF در XM-86 PAC از برنامه JEOL پردازش شدند.

طیف‌سنجی ریز رامان گارنت‌ها با دستگاه JASCO (با سه تک‌رنگ ۶۰ × ۳ سانتی متر) در آزمایشگاه رامان دکتر لیبویتزکی رنیشاو در دانشگاه وین انجام شد. خط ۴۸۸ نانومتری یک لیزر Ar بر یک ناحیه ۱ میکرومتر مربع از سطح نمونه با میکروسکوپ متمرکز شد (پراکندگی هندسه ۱۸۰ درجه). قدرت لیزر ۱۰ مگاوات در سطح نمونه بود. طیف‌هایی که به مدت ۵-۴ برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه جمع آوری شده بودند، با یک آشکارساز چند کانالی اندازه‌گیری شدند. موقعیت و پهنای کامل در نیم شدت بیشینه (FWHM) قله رامان با انجام اتصالات لورنتزیایی از طیف مورد نظر اندازه گیری شد. تعداد طول موج رامان با استفاده از خطوط انتشار ۶۱۱cm^{-1} تغییر رامان با یک لامپ نئون اندازه‌گیری شد. عرض شکاف طیفی ۳ سانتی متر و میانگین دمای اتاق حدود ۲۰٫۵ درجه سانتی گراد بود. جزئیات بیشتر از روش تجزیه در مرجع [۲۱] شرح داده شده است.

سنگ نگاری

بررسی شکفته بلورها می‌تواند در تعیین رخدادهای دگرگونی، فازهای دگرگونی و بررسی زمین ساختی منطقه موثر باشد. کانی گارنت از فراوان ترین شکفته‌بلورها در انواع مختلف سنگ‌های دگرگونی است (جدول ۱).

بافت اصلی سنگ‌های دارای گارنت شکفته بلوری است. بافت ورقه شکفتی نیز به عنوان یک بافت فرعی در این سنگ‌ها وجود دارد. گارنت همراه با کوارتز، موسکویت و بیوتیت کانی‌های اصلی تشکیل دهنده گارنت شیست‌ها هستند و کانی‌های کلریت، زیرکن، آپاتیت و کانی‌های کدر به عنوان کانی‌های ثانویه وجود دارند [۲۲].

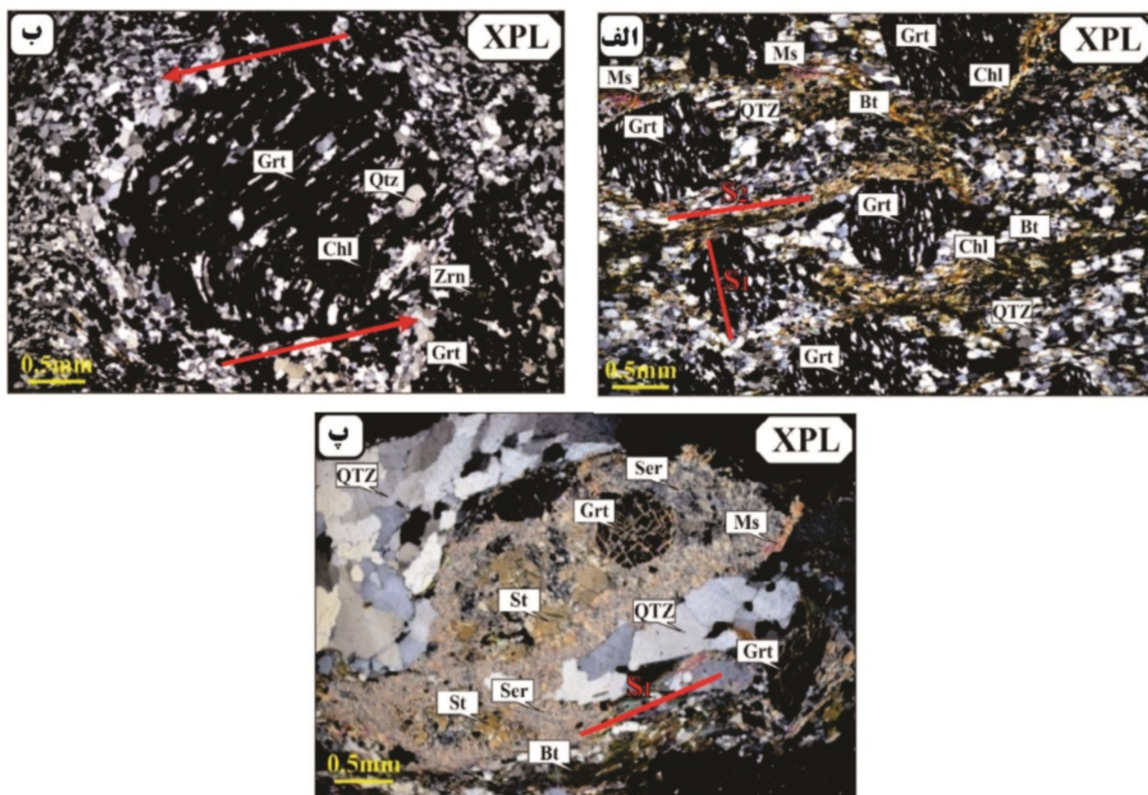
بررسی ریزسکوپی نمونه‌های دارای گارنت، سه نسل از گارنت را نشان می‌دهد که هر یک با یک فاز دگرگونی و زمین ساختی در ارتباط هستند. (۱) نسل اول گارنت دارای الگوی میانبارهای چرخشی (Grt1) است. در این گارنت‌ها، هیچ گسستگی بین برگوارگی داخلی و زمینه وجود ندارد و لبه کرنشی نامتقارن [۲۳] نشان دهنده تبلور همزمان گارنت‌های S_1 (همزمان با زمین ساخت) است که در طی شکل‌گیری چرخیده‌اند [۲۴] (شکل ۳ الف). (۲) نسل دوم گارنت‌های بین دو فاز زمین‌ساختی (Grt2) هستند که همزمان با S_1 برگوارگی اولیه رشد کرده و میانبارهای زمینه را در خود حفظ کرده‌اند و برگوارگی بعدی S_2 در سنگ با جهت‌گیری متفاوت از برگوارگی اولیه ایجاد شده است. لبه کرنشی نامتقارن از موسکویت، پلاژیوکلاز و کوارتز تشکیل شده است (شکل ۳ب). (۳) نسل سوم گارنت، گارنت‌های پس از زمین‌ساخت (Grt3) هستند که می‌توانند به آخرین مرحله رشد گارنت در فاز دگرگونی S_1 نسبت داده شوند. این نوع گارنت فقط در پهنه دگرگونی استارولیت دیده می‌شود. گارنت‌ها بی شکل، بسیار خرد شده و گرد شده هستند و محل شکستگی‌های درون گارنت با موسکویت پر شده است (شکل ۳پ).

جدول ۱ گردهمایی کانی‌های گارنت شیست و گارنت-استارولیت شیست در منطقه مورد بررسی.

شماره نمونه	نوع سنگ	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	Qtz	Bt	Ms	Grt	St	Pl	Fsp	Chl	Ser	Sd	Tur	Zrn	Op
H-۲	گارنت شیست	۵۵°۱۵´۱۱´´	۲۹°۲۴´۱۰´´	X, X(Inc)	X	X, X(Inc)	X				Xret, X(Inc)		Xret	O	O	X, X(Inc)
H-۱۷	گارنت شیست	۵۵°۰۴´۰۱´´	۲۹°۲۸´۰۱´´	X, X(Inc)		X, X(Inc)	X				Xret, X(Inc)				O	X, X(Inc)
H-۲۲۰	گارنت استارولیت شیست	۵۵°۰۱´۰۰´´	۲۹°۱۷´۴۱´´	X	X	X	X	X	X	X	Xret	Xret		O	O	X

X: کانی اصلی، O: کانی فرعی، Xret: کانی دگرسانی، X(Inc): کانی ادخالی

علامت اختصاری کانی ها برگرفته از J. Siivola & R. Schmid (2007)



شکل ۳ الف) گارنت شیست‌ها در شرق منطقه به عنوان شکفته بلورهای بین زمین ساختی با بافت غربالی، ب) گارنت شیست‌ها در بخش شمالی منطقه مورد بررسی با حالت گلوله برفی، پ) گارنت-استارولیت شیست در منطقه مورد بررسی و شکفته بلورهای درشت و شکسته شده استارولیت، که به صورت همزمان با زمین ساخت متبلور شده اند. (Grt: گارنت؛ St: استارولیت؛ Bt: بیوتیت؛ Ms: موسکویت؛ Chl: کلریت؛ Qtz: کوارتز؛ Zrn: زیرکن).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.8.4]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.295]

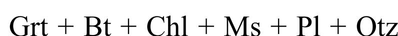
نتایج

تاریخچه واکنش‌های دگرگونی

گردهمایی کانیایی عمده دگرگونی ناحیه‌ای در گارنت شیست های منطقه انجیرخواجه به صورت زیر است:


Grt + Chl + Ms + Pl + Qtz

رخساره شیست‌سبز بالایی [۱]


Grt + Bt + Chl + Ms + Pl + Qtz

رخساره اپیدوت آمفیبولیت [۲]

وجود کلریت، مسکوویت، بیوتیت و گارنت در گارنت شیست‌ها پیشنهاد می‌دهد که به احتمال بسیار گارنت با واکنش‌های پیوسته (واکنش‌هایی که معاوضه کاتیونی در گستره دمایی – فشاری گسترده انجام شده و در دو سمت معادله کانی‌هایی وجود دارند که با هم معاوضه کاتیونی گسترده‌ای دارند) آب-زدایی زیر تولید شده‌باشد [۲۵] (شکل ۴ الف):

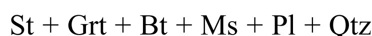

Chl + Ms = Grt + Bt + Chl + (۳)


Chl + Ms = Grt + Bt + Qtz + (۴)

دانه‌های گارنت غربالی هستند و در طول syn-D_2 تشکیل شده‌اند. آن‌ها از آلماندن غنی و دارای منطقه‌بندی مشخصی در ترکیب شیمیایی از مرکز به سمت لبه هستند. این واکنش‌ها در دماهای بالاتر نیز می‌توانند باعث تولید گارنت و بیوتیت در گارنت شیست‌های درجه بالاتر شوند. واکنش‌های (۳) و (۴) در رخساره شیست سبز بالایی رخ داده‌اند.

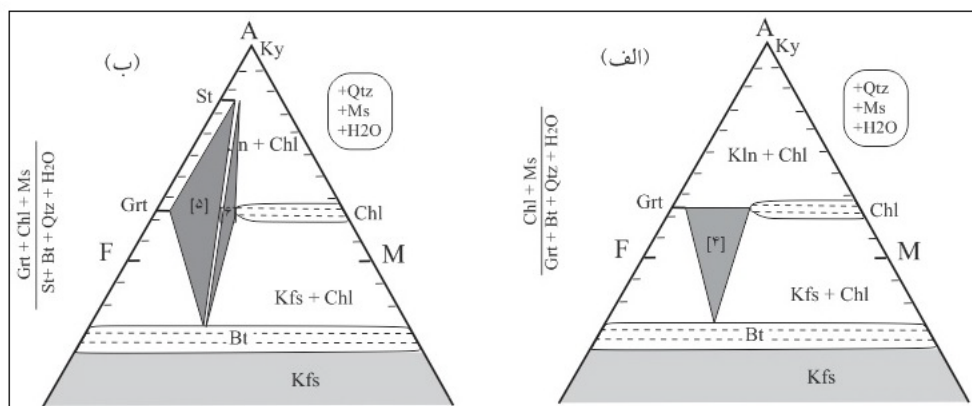
استارولیت به‌صورت دانه‌های درشت و غربالی در راستای برگوارگی دیده می‌شود. دنباله‌های دربرداری در آن‌ها بیشتر سینوسی هستند و به برگوارگی زمینه می‌رسند. دربرداری‌ها بیشتر شامل کوارتز + ایلمنیت هستند، اما گاه گارنت نیز بر روی استارولیت وجود دارد (شکل ۳پ). حضور گارنت در داخل استاورولیت نشان می‌دهد که گارنت پس از استارولیت و یا هم-زمان با آن رشد کرده‌است. بنابراین استارولیت نیز syn-D_2 است. دانه‌های استارولیت در بخش‌هایی از سنگ رشد کرده‌اند که سیلیکات‌های صفحه‌ای چون بیوتیت و مسکوویت فراوان هستند بنابراین ترکیب سنگ مادر در رشد آن‌ها مهم بوده‌است [۲۶].

بلورهای گارنت و استارولیت در این همبرزایی‌ها دانه درشت هستند و در زمینه حضور دارند (همبرزایی [۵]). آن‌ها نیز دارای دربرداری‌های کمی و همه ناشی از رشد در طول D_2 هستند. در سنگ‌های رسی با درجه دگرگونی بالا، بلورهای استارولیت بشدت تحلیل رفته‌اند و فقط به‌صورت دربرداری در دانه‌های سرسیت، پلاژیوکلاز و کوارتز وجود دارند (شکل ۳پ). این سنگ‌ها فقط شامل همبرزایی


St + Grt + Bt + Ms + Pl + Qtz

رخساره آمفیبولیت زیرین [۵]

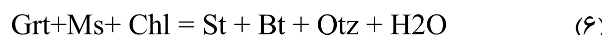
همراه با مقدار بسیار کمی کلریت در لبه‌های دیگر کانی‌ها و در زمینه هستند. تشخیص اینکه کلریت‌های زمینه از واکنش-های پیشرونده یا پسرونده ایجاد شده‌اند بسیار مشکل است. کانی‌های بیوتیت+ مسکوویت + پلاژیوکلاز + کوارتز + ایلمنیت + روتیل در زمینه وجود دارند. چنین همبرزایی کانیایی در شرایط اوج دگرگونی در سنگ‌های گارنت استارولیت شیست منطقه انجیرخواجه دیده شده است.



شکل۴ روابط شیمی نگاشتی نمودارهای فازی ترکیبی AFM برای سنگ‌های متاسدیمنت منطقه انجیرخواجه: الف) گارنت شیست، ب) گارنت استارولیت شیست. خط‌چین‌ها نشان دهنده فازهای واکنش کننده هستند. اعداد در کروشه همبرزایی‌ها را معرفی می‌نماید.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.8.4]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.295]

وجود دربرداری‌های گارنت و ایلمنیت در استارولیت همراه با کلریت، مسکوویت، پلاژیوکلاز و کوارتز در زمینه (همبرزایی [۶]؛ نمودارهای فازی ترکیبی شکل ۴ب) واکنش ناپیوسته زیر را برای تشکیل استارولیت پیشنهاد می‌کند:



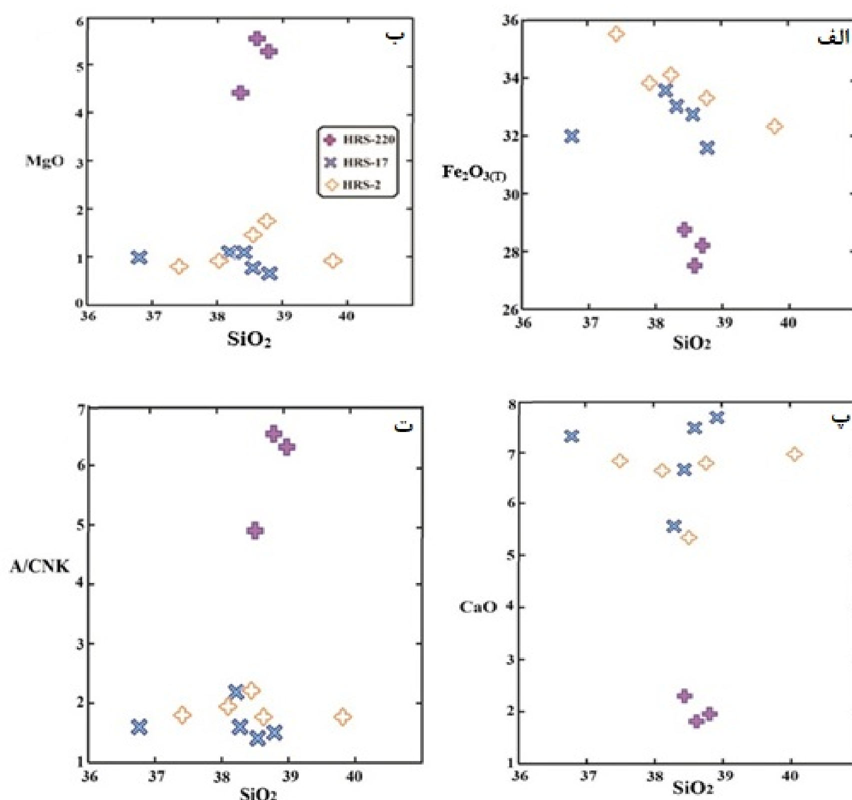
$$Grt+Ms+Chl = St + Bt + Qtz + H_2O \qquad (۶)$$

(واکنش ناپیوسته واکنشی مربوط به گستره‌های دمایی- فشاری ویژه است که در آن کانی‌هایی که معاوضه کاتیونی محدودی دارند یا ندارند، چون Pl، St و Ky، در یک سمت معادله قرار می‌گیرند). از آنجا که پهنه استارولیت گسترش زیادی در منطقه ندارد، استارولیت به سرعت کاهش می‌یابد. واکنش (۶) در رخساره آمفیبولیت زیرین رخ داده‌است.

شیمی کانی گارنت

نتایج تجزیه گارنت که در جدول ۱ آورده شده است [۱۸]، طیف گسترده‌ای از ترکیب عناصر اصلی را نشان می‌دهد. اندازه گیری‌ها بر ده‌ها نقطه از شکفته بلورهای گارنت انجام شده است. تجزیه گارنت‌ها، مجموع کل را از ۹۸/۵۶ تا ۱۰۲/۰۹ درصد وزنی نشان می‌دهد. گارنت‌ها از ۳۶/۷۹ تا ۳۹/۸۰ درصد وزنی در SiO_2، ۱۸/۳۶ تا ۲۲/۴۱ درصد وزنی در Al_2O_3، ۱/۸۰ تا ۷/۵۹ درصد وزنی در CaO، ۲۷/۷۷ تا ۳۴/۵۲ درصد وزنی در FeO و ۰/۰۰ تا ۰/۱۶ درصد وزنی در مقدار TiO_2 متفاوت هستند.

نمودارهای Fe_2O_3 نسبت به SiO_2، MgO نسبت به SiO_2، CaO نسبت به SiO_2 و A/CNK نسبت به SiO2 (شکل ۵) نشان می‌دهد که گارنت شیست‌های HRS-2, HRS-17، دارای Fe_2O_3 و CaO بالا اما MgO و Al_2O_3 کمی هستند. آن‌ها می توانند یک محلول جامد بین آلماندین و گروسولار باشند. گارنت استارولیت شیست‌ها (HRS-220) با MgO و Al_2O_3 بالا مشخص می‌شوند که می‌توانند محلول جامد آلماندین-پیروپ باشند.



شکل ۵ نمودارهای مقایسه‌ای گارنت شیست و گارنت-استارولیت شیست از منطقه انجیرخواجه: الف) نمودار SiO_2 نسبت به $Fe_2O_3(T)$، که نشان می دهد که گارنت شیست‌ها دارای بیشترین $Fe_2O_3(T)$ و گارنت-استارولیت شیست‌ها دارای موقعیت برعکس هستند. ب) نمودار SiO_2 نسبت به MgOکه براساس آن گارنت شیست‌ها مقدار MgO پایین و گارنت-استارولیت شیست‌ها مقدار Mgo بالاتری دارند. پ) نمودار SiO_2 نسبت به CaO که بر پایه آن گارنت شیست‌ها دارای CaO بالاتری نسبت به گارنت-استارولیت شیست‌ها هستند. ت) نمودار SiO_2 نسبت به $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$که نشان می دهد که گارنت-استارولیت شیست‌ها دارای Al_2O_3 بالا و گارنت شیست‌ها دارای موقعیت برعکسی هستند.

ترکیب متوسط گارنت در گارنت شیست‌های (HRS-2, HRS-17) بیشتر به صورت آلماندین است. گستره عضو پایانی نمونه HRS-2، Alm72-81Prp2-20Sps0-3 Grs7-22 و ترکیب نمونه HRS-17، Alm67-78Prp3-5Sps1-7Grs16-22 است. گارنت-استارولیت شیست‌ها (HRS-220) بیشتر یک محلول جامد بین آلماندین و پیروپ هستند (Alm61-64Prp17-22Sps11-13 Grs5-7).

با توجه به نمودارهای سه گانه Al-Py-Gr و Al-Sp+Py-Gr [۲۷]، ترکیب گارنت از گارنت شیست‌ها در نمونه‌های HRS-2 و HRS-17 بیشتر محلول جامد آلماندین و گروسولار است. گارنت-استارولیت شیست در نمونه- HRS 220 بیشتر محلول جامد آلماندین-پیروپ است. ترکیب غالب هر دو آلماندین است (شکل ۶).

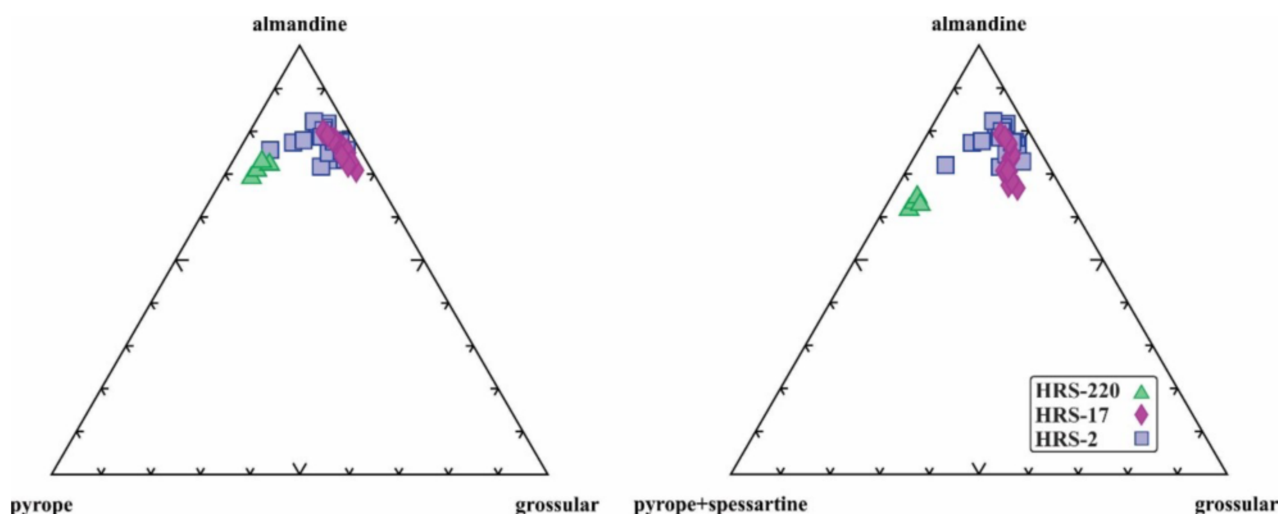
طیف سنجی رامان

پژوهش پیرامون گارنت‌های غیرسیلیکاتی که فناوری کاربردهای مهمی دارند در دهه ۱۹۶۰ آغاز شد. نخستین بررسی دقیق رامان در مورد گارنت ۱۹۶۹-۱۹۶۸ [۲۸، ۲۹] انجام شد. سپس گارنت های سیلیکاتی ($X_3Y_2Si_3O_{12}$) که از نظر زمین شناسی دارای اهمیت هستند، [۳۰-۳۳] بررسی شدند.

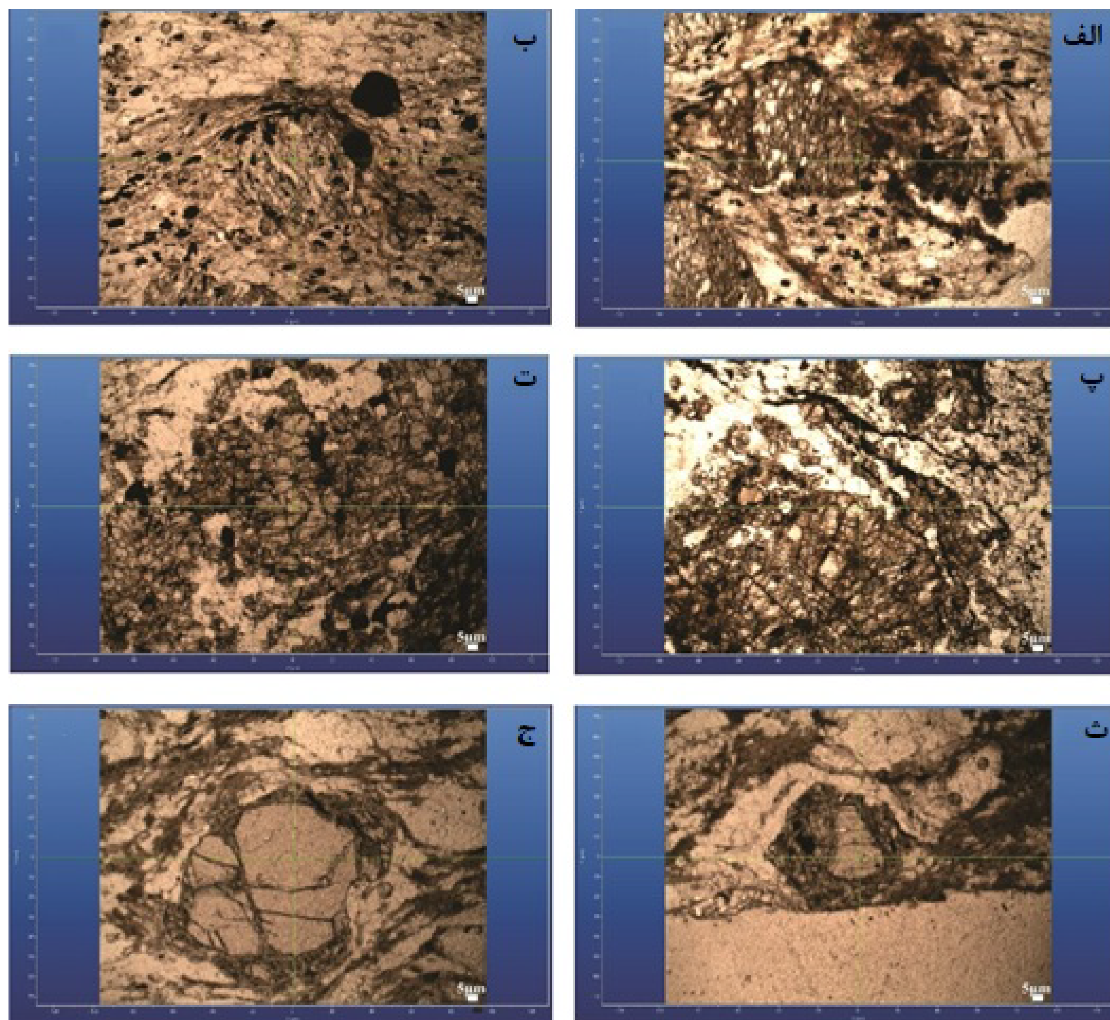
در این پژوهش فرض می‌شود که در گروه گارنت، قله‌های رامان نشان‌دهنده یک حالت رفتاری بوده و در محلول جامد گارنت، بسامدهای مختلف رامان ترکیبی خطی از بسامدهای اعضای پایانی بر اساس وزن مولکولی آن‌ها باشد [۳۲-۳۷].

طیف‌های رامان گارنت‌ها معمولاً به دو ناحیه تقسیم می‌شوند: ارتعاش‌های خارجی زیر ۴۰۰ cm^{-1} و ارتعاش‌های داخلی بالای ۴۰۰ cm^{-1}. بخش اول ناحیه ارتعاش‌های خارجی تا ۳۲۰cm^{-1}، مربوط به چاروجهی SiO_4 و جابجایی کاتیون‌های دو ظرفیتی است. بین ۳۲۰ تا ۴۰۰cm^{-1}، ارتعاش واحدهای SiO_4 دیده می‌شود. در ناحیه مربوط به چاروجهی‌های SiO_4، ارتعاش‌های داخلی بین ۴۰۰ تا ۶۵۰ cm^{-1} مربوط به حالت‌های خمشی O-Si-O مشخص است، در حالی‌که حالت‌های کششی Si-O در عدد موج‌های بالاتر از ۸۰۰cm^{-1} یافت می‌شوند [۳۱، ۳۸].

حدود ۱۰ بلور کانی گارنت از نمونه‌های گارنت در منطقه انجیرخواجه سیرجان برای طیف سنجی رامان انتخاب شدند (شکل ۷). در بررسی‌های رامان برای بیش از ۵۰ نمونه جدا شده، ۳ قله شدیدتر با عدد موج زیر ۱۰۳۳ cm^{-1} به دست آمد. بر اساس اندازه‌گیری‌های بسیار، موقعیت قله‌ها در گستره گسترده‌ای از طول موج‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۶ موقعیت گارنت‌ها در نمودارهای مثلثی Al-Py-Gr و Al-Sp+Py-Gr [۲۴]، که براساس آنها ترکیب غالب گارنت‌ها آلماندین است.



شکل ۷ تصاویر ریز رامان گارنت‌ها در گارنت شیست منطقه انجیرخواجه، الف، ب) نمونه HRS-2، پ، ت) نمونه HRS-17 و ث، ج) نمونه HRS-220.

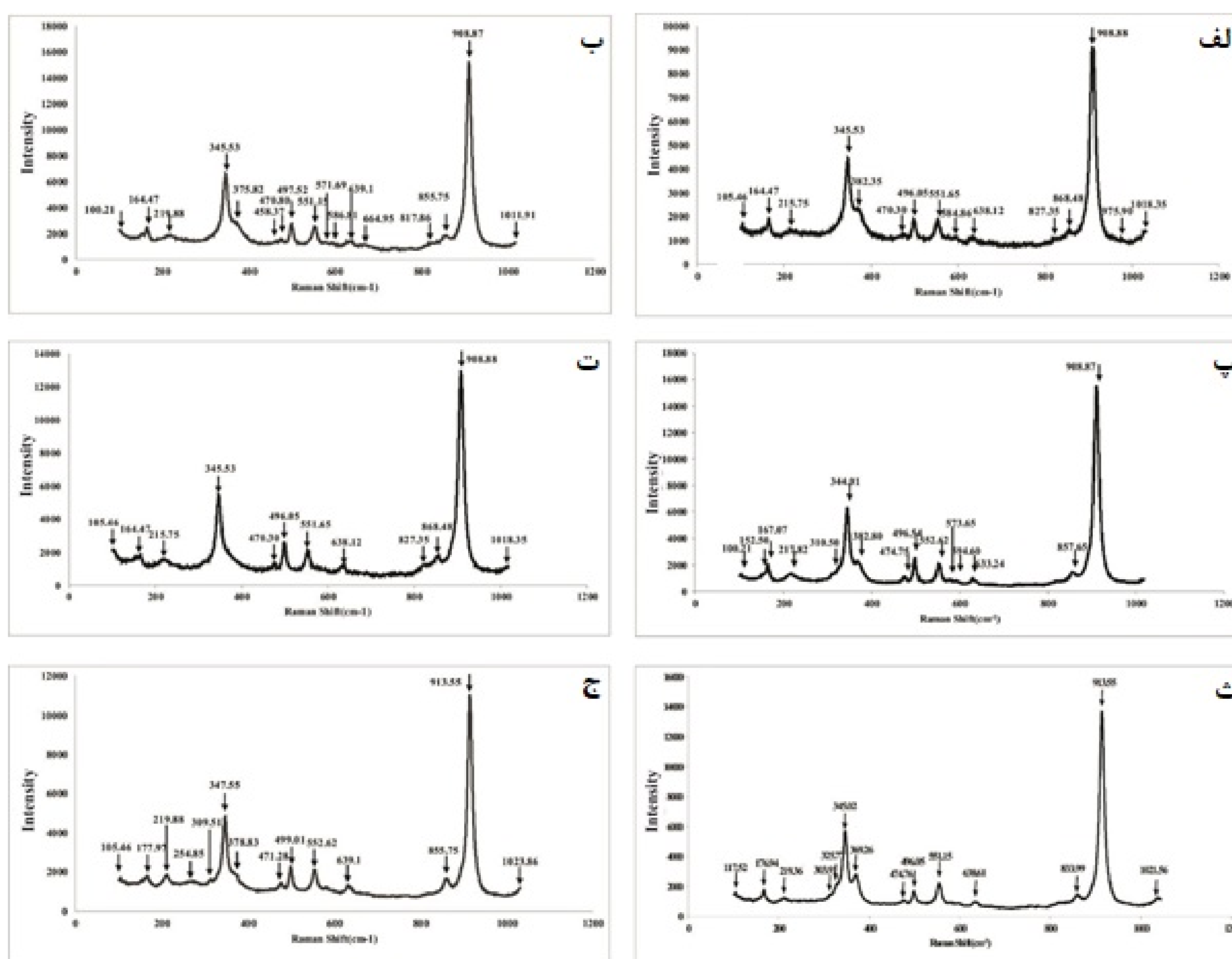
جدول ۲ خلاصه آمار تعداد طول موج‌های رامان در (cm^{-1}) از چهار پیک اصلی گارنت شیست (HRS-2) و (HRS-17) و گارنت-استارولیت شیست (HRS-220).

شماره نمونه	پیک < ۸۰۰	پیک ۶۵۰-۴۰۰	پیک ۴۰۰-۳۲۰	پیک > ۳۲۰	
HRS-۲	۸۱۷/۸۶	۴۷۰/۳	۴۳۵/۰۲	۲۱۹/۸۸	بیشترین
HRS-۲	۱۰۱۸/۳۵	۶۳۸/۱۲	۳۸۲/۳۵	۱۰۰/۲۱	کمترین
HRS-۲	۹۰۸/۸۷	۵۵۱/۶۵	۳۴۵/۵۳	۱۶۴/۴۷	میانگین
HRS-۱۷	۱۰۱۸/۳۵	۴۷۰/۳	۳۸۲/۸	۳۱۰/۵	بیشترین
HRS-۱۷	۸۲۷/۳۵	۶۳۸/۱۲	۳۴۴/۰۱	۱۰۰/۲۱	کمترین
HRS-۱۷	۹۰۸/۸۸	۵۵۲/۶۲	۳۴۵/۵۳	۲۱۵/۷۵	میانگین
HRS-۲۲۰	۱۰۲۳/۸۶	۴۷۱/۲۸	۳۷۸/۸۳	۳۰۹/۵۱	بیشترین
HRS-۲۲۰	۸۳۳/۹۹	۶۳۸/۶۱	۳۲۵/۷	۱۰۵/۴۶	کمترین
HRS-۲۲۰	۹۱۳/۵۵	۵۵۱/۱۵	۳۴۷/۵۵	۲۱۹/۸۸	میانگین

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.8.4]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.295]

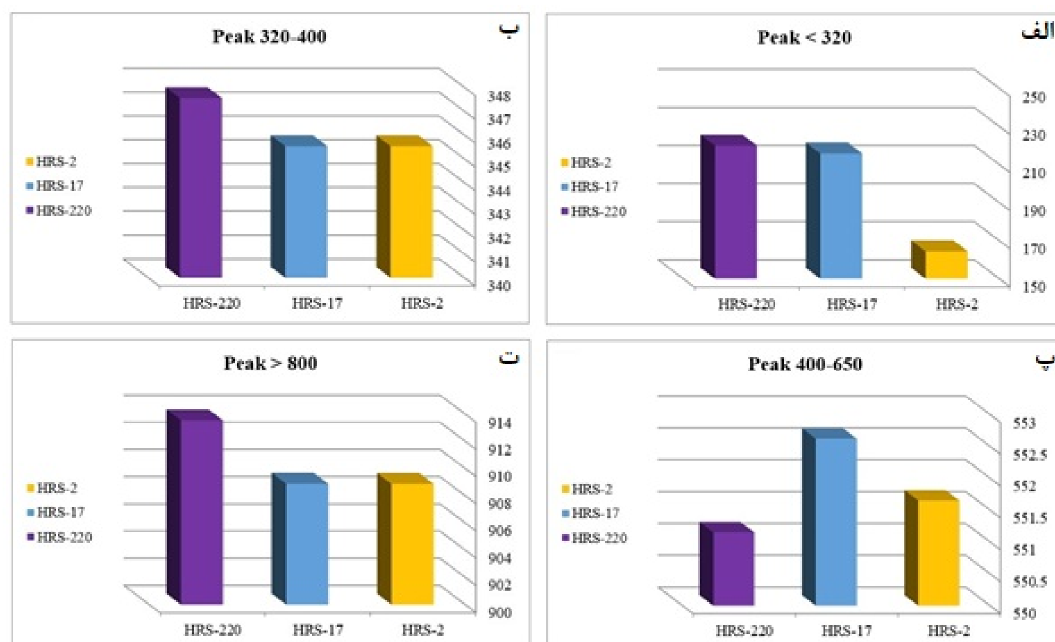
طیف رامان گارنت‌های منطقه مورد بررسی شامل سه قله با بیشترین شدت به ترتیب در حدود ۳۵۰، ۵۵۰ و ۹۰۰cm^{-1} است که به ترتیب مربوط به ارتعاش‌های کششی (Si-O)، ارتعاش‌های خمشی (Si-O) و ارتعاش‌های چرخشی $R(SiO_4)^{4-}$ هستند [۳۸]. این خطوط مربوط به ترکیب شیمیایی گارنت هستند (شکل ۸).

سه نسل از کانی‌های گارنت غنی از آلماندین، غنی از گروسولار و غنی از پیروپ در سنگ نگاری، شیمی کانی و طیف‌سنجی رامان بررسی و رده‌بندی شدند. نوع غنی از آلماندین دارای مقدار آهن بیشتر و کمترین قله در عدد موج زیر ۳۲۰cm^{-1} نشان دهنده کمترین چاروجهی‌های SiO_4 و جابجایی کاتیون‌های دو ظرفیتی است. نوع غنی از گروسولار مقدار آهن به نسبت کم، مقدار کلسیم بیشتر و شدیدترین قله در عدد موج‌های بین ۴۰۰ تا ۶۵۰ cm^{-1} دارد و بیانگر حالت‌های خمشی O-Si-O است که Ca^{2+} به دلیل شباهت در اندازه و جرم جایگزین Fe^{2+} در جایگاه موقعیت X می‌شود. نوع غنی از پیروپ دارای منیزیم بیشتر، آهن کمتر و شدیدترین قله در عدد موج‌های بالاتر از ۸۰۰ cm^{-1} و نشان‌دهنده حالت‌های کششی Si-O است که Mg^{2+} به دلیل شباهت با Fe^{2+} در اندازه و جرم در جایگاه X جایگزین می‌شود. تقریباً همه نمونه‌های گارنت یک محلول جامد از دو حالت رفتاری آلماندین-گروسولار و آلماندین-پیروپ را نشان می‌دهند (شکل ۹).



شکل ۸ طیف ریز رامان گارنت‌ها در گارنت شیست منطقه انجیرخواجه، الف، ب) نمونه HRS-2، پ، ت) نمونه HRS-17 و ث، ج) نمونه HRS-220.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.8.4]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.295]



شکل ۹ نمودارهای ستونی موقعیت‌های پیک‌های رامان. رنگ‌های مختلف نشانگر انواع مختلف گارنت هستند. الف، ب، پ و ت به ترتیب کمتر از $320\ cm^{-1}$، $320\text{-}400\ cm^{-1}$، $400\text{-}650\ cm^{-1}$ و بیشتر از $800\ cm^{-1}$ را نشان می‌دهند.

زمین شیمی و محیط زمین ساختی متاسدیمنت‌ها

بر اساس نمودار MgO/CaO نسبت به P_2O_5/TiO_2 [۳۹]، سنگ خاستگاه گارنت شیست‌ها رسوبی است (شکل ۱۰ الف). رده بندی سنگ‌های رسوبی بر اساس Ti و Zr [۴۰] ترکیب رسوب‌های اولیه در منطقه را به عنوان شیل و ماسه‌سنگ ارزیابی می‌کند (شکل ۱۰ ب).

جایگاه زمین‌ساختی گارنت شیست‌ها بر پایه عناصر فرعی و کمیاب تعیین می‌شود. از عناصر کمیاب برای توصیف محیط-های جزایر قوسی اقیانوسی (OIA)، جزایر قوسی قاره‌ای (CIA)، کرانه قاره‌ای فعال (ACM) و کرانه غیرفعال (PM) استفاده شد. براساس نمودارهای Ti/Zr نسبت به La/Sc و Sc-Th-Zr/10، گارنت شیست‌های مجموعه دگرگونی انجیرخواجه در جایگاه جزایر قوسی قاره‌ای قرار دارند [۴۱] (شکل ۱۱).

بحث و بررسی

ساختارهای اصلی پهنه سنندج-سیرجان طی سه رویداد مهم فرورانش بخش شمال شرقی صفحه عربستان زیر صفحه مرکزی ایران، تشکیل افیولیت‌های کمربند سنندج-سیرجان و سرانجام برخورد قاره‌ای بین دو صفحه در میوسن شکل گرفته‌اند [۷]. تکامل پهنه سنندج-سیرجان با باز و بسته شدن نئوتتیس در کرانه جنوب شرقی گندوانا کنترل شده است [۴۲، ۴۳].

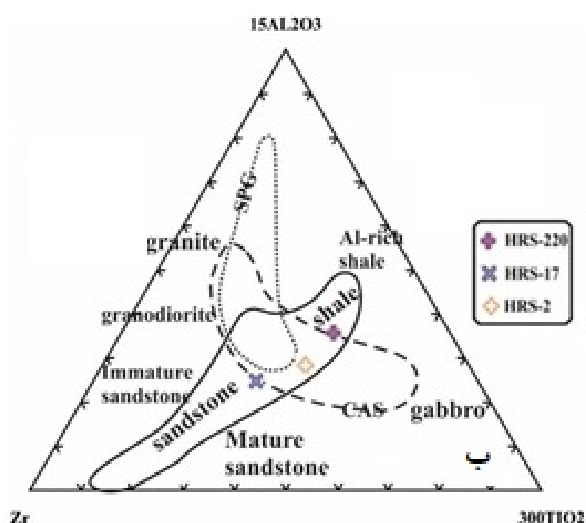
بسته شدن حوضه پالئوتتیس در شمال منجر به باز شدن نئوتتیس شده است [۴، ۴۴،۴۵]. شکل‌گیری و سپس گسترش اقیانوس نئوتتیس از پرمین تا تریاس رخ داده است. توالی سنگی وابسته با گسترش نئوتتیس بیشتر مربوط به اواخر تریاس در پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان است. فرورانش اقیانوس نئوتتیس در اواخر تریاس تا کرتاسه منجر به تغییر شکل، دگرگونی و ناپیوستگی در زیر واحدهای کرانه قاره‌ای شد و سپس با تغییر شکل به پایان رسید [۱۴].

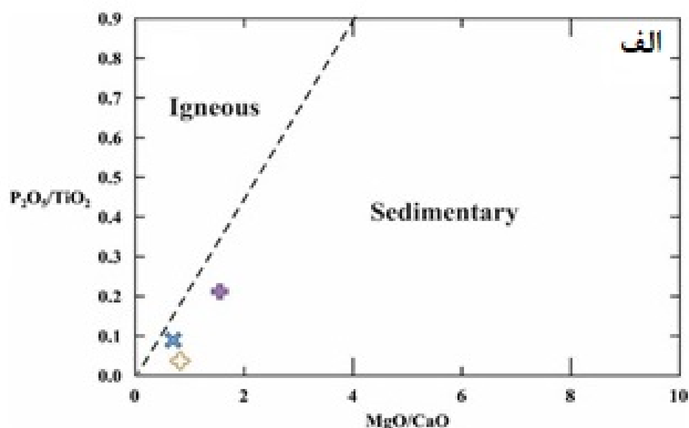
سنگ‌های منطقه مورد بررسی شامل مجموعه‌ای از سنگ-های دگرگونی با خاستگاه آذرین و رسوبی هستند. طی دگرگونی ناحیه‌ای در منطقه، سنگ‌ها به گارنت شیست‌ها، آمفیبولیت‌ها، متابازیت‌ها، سرپانتینیت‌ها، گنیس‌ها، کوارتزیت‌ها و مرمرها دگرگون شده‌اند. بعضی از سنگ‌ها به دلیل اثر چند فاز دگرگونی در گستره‌ای از رخساره‌های شیست سبز، رخساره‌های اپیدوت آمفیبولیت و رخساره‌های آمفیبولیت دگرگون شده‌اند.

در اثر کوهزایی سیمرین پیشین، سنگ‌های مادر رسوبی پلتیک و سمی پلتیک در منطقه انجیرخواجه، دستخوش دگرگونی در حد رخساره شیست بالایی تا رخساره آمفیبولیت زیرین شده‌اند.

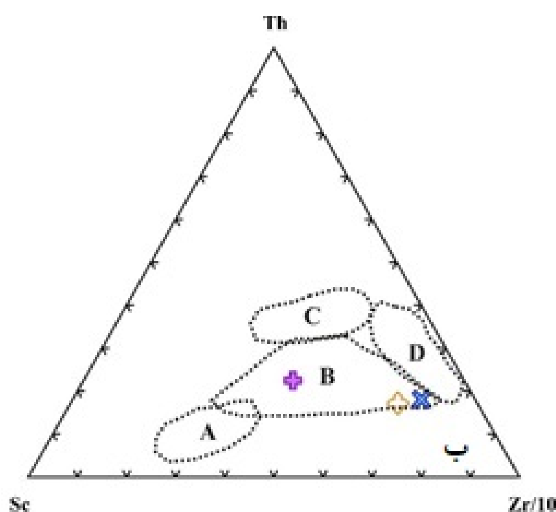
[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.8.4]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.295]

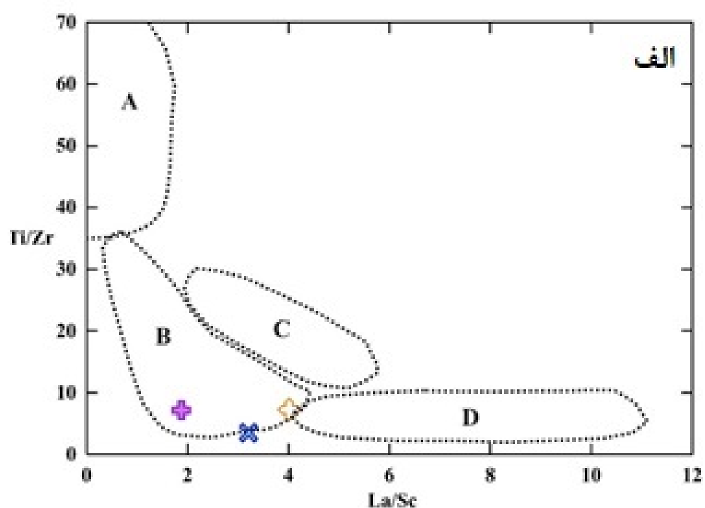
[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.8.4]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.295]





شکل ۱۰ الف) نمودار تشخیصی سنگ‌های رسوبی و آذرین [۳۶]؛ که براساس آن نمونه‌ها در گستره رسوبی قرار دارند. ب) رسوب‌های اولیه گارنت شیست‌ها در منطقه شیل و ماسه سنگ در نمودار سه تایی Zr-Al-Ti [۳۷].





شکل ۱۱ الف) نمودار Ti/Zr نسبت به La/Sc و ب) نمودار مثلثی Sc-Th-Zr/10 برای تشخیص محیط زمین ساختی [۳۸] که براساس آن گارنت شیست‌ها در جایگاه جزایر قوسی قاره ای قرار دارند. (A: جزیره قوسی اقیانوسی، B: جزیره قوسی قاره ای، C: کرانه قاره ای فعال و D: کرانه غیرفعال.

توالی سنگ‌های حوزه رسوبی خیرآباد، در معرض دو رخداد دگرگونی (M_1, M_2) و دو فاز دگرشکلی (D_1, D_2) قرار گرفته‌اند. با اثر نیروهای زمین‌ساختی ناشی از فاز کوهزایی سیمرین پیشین، فاز دگرشکلی D_1 که با رخداد دگرگونی M_1 همراه است، باعث ایجاد برگوارگی S_1 موازی با سطح محوری چین‌های مرحله اول شده است. سپس در اثر کوهزایی سیمرین پسین عملکرد فاز دگرشکلی فشارشی باعث گسترش دگرشکلی D_2 و چین‌خوردگی شدید و ایجاد رخداده دگرگونی M_2 شده است. در اثر این دگرشکلی، برگوارگی S_2 با ایجاد شیستوارگی موازی با سطح محوری چین‌های مرحله دوم گسترش یافته است. اوج دگرگونی و رشد شکفته بلورها در اثر این رخداد بوده است.

سنگ‌های رسوبی پلتیک و سمی پلتیک دگرگون شده به دلیل وجود بسیاری از کانی‌های مهم چون گارنت برای تعیین شرایط دگرگونی بررسی شدند. در این نوع سنگ‌ها، پهنه‌های دگرگونی و گردهمایی کانی‌ها در شرایط مختلف ترمودینامیکی

به خوبی گسترش می‌یابند. گارنت شیست‌های منطقه، شیست-های پلتیک و دارای گارنت، استارولیت، بیوتیت، موسکویت، کلریت و کوارتز هستند.

گروه گارنت یک خانواده‌ای از کانی‌ها با ترکیب‌های شیمیایی متغیر، اما ساختارهای مشابه است. مخلوطی از چند کانی گارنت (اعضای پایانی) باعث ترکیب شیمیایی پیچیده ای برای بسیاری از گارنت‌های طبیعی می‌شود. ترکیب‌های برآورد شده بر پایه طیف‌سنجی ریز رامان با نتایج ریزپردازش الکترونی برای همه گارنت‌ها همخوانی دارد. گروه گارنت یک سامانه عالی برای بررسی ویژگی‌های طیف‌سنجی ارتعاشی ساختارهای سیلیکاتی است. ساختار آن نسبت به بسیاری از مواد معدنی به نسبت پیچیده، اما به دلیل تقارن بالا (گروه فضایی Ia3 Åd)، طیف‌ها و بررسی آنها به نسبت ساده است. همچنین، تعداد زیادی از اعضای پایانی متفاوت گارنت‌ها از نظر ترکیب، بررسی تغییرات طیف‌ها با تغییر شیمی را ممکن می‌سازند. طیف-سنجی رامان افزون بر شناسایی کانی‌ها، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد پیوند و حالت ساختاری کانی ارائه دهد [۴۶]. محاسبه ترکیب شیمیایی تقریبی گارنت براساس موقعیت خطوط در طیف رامان امکان پذیر است. طیف رامان گارنت شامل سه خط با بیشترین شدت به ترتیب در حدود ۳۵۰، ۵۵۰ و ۹۰۰ به ترتیب مربوط به کشش Si-O، خمش Si-O و ارتعاش‌های چرخشی $R(SiO4)^{4-}$ است. این خطوط به ترکیب شیمیایی گارنت حساس هستند [۳۸].

مقایسه داده‌های ریزپردازش الکترونی با نتایج طیف‌سنجی رامان نشان می‌دهد که تعیین انواع گارنت بر پایه طیف‌سنجی رامان برای اعضای پایانی یا محلول‌های جامد شامل دو کانی قابل اطمینان‌تر است. اگر ترکیب شیمیایی گارنت پیچیده‌تر و شامل چند کانی باشد، این روش ممکن است به درستی کار نکند [۴۷].

بسامدهای مختلف در گروه گارنت‌های آلومینوسیلیکاتی تابعی از کاتیون‌های جایگاه X و چاروجهی SiO_4 هستند. در مورد محلول جامد، گارنت‌ها پدیده دو حالت رفتاری را ارائه می‌دهند [۳۰]. دو حالت رفتاری در گارنت‌های دوتایی بر اساس تفاوت زیاد در اندازه و جرم بین کاتیون‌های مختلف در جایگاه X تفسیر می شود [۴۸].

برداشت

سنگ‌های دگرگونی مورد بررسی در شمال غربی معدن آهن گل گهر در جنوب شرقی پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان واقع هستند. ترکیبی از نتایج ریزپردازش الکترونی و طیف‌سنجی رامان کانی‌های گارنت سنگ‌های گارنت شیست در منطقه انجیرخواجه سیرجان، معدن آهن گل گهر بررسی شد. شیمی کانی گارنت‌ها در گارنت شیست‌های منطقه مورد بررسی غنی از آلماندین و گروسولار است، در حالی که گارنت‌ها در گارنت-استارولیت شیست از آلماندین و پیروپ غنی تر از سایر اعضای پایانی گارنت هستند. طیف رامان گارنت‌ها در منطقه مورد بررسی شامل سه قله شدید در حدود ۳۵۰، ۵۵۰ و ۱۹۰۰ است و بر این اساس، تقریباً همه نمونه‌های گارنت محلول جامد از دو حالت رفتاری آلماندین-گروسولار و آلماندین-پیروپ را نشان می‌دهند. در گارنت‌ها، به دلیل اندازه و جرم مشابه Fe^{2+}، Ca^{2+} و Mg^{2+} یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} جایگزین Fe^{2+} در جایگاه X شده‌اند. به طور کلی، گارنت‌های مورد بررسی منطقه‌بندی با بیشترین میزان در آلماندین را نشان می‌دهند. بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که گارنت شیست‌ها و گارنت-استارولیت شیست‌ها، رخساره‌های دگرگونی متوسط تا بالا را ثبت می‌کنند. با توجه به همه این موارد، فعالیت ماگمایی اواخر ژوراسیک در جنوب شرقی پهنه سنندج-سیرجان باعث شکل گیری اقیانوس نئوتتیس شده است و سنگ‌های دگرگونی در یک جایگاه جزایر قوس قاره‌ای در اثر دگرگونی سنگ‌های مادر رسوبی پلتیک و سمی پلتیک در حد رخساره شیست بالایی تا رخساره آمفیبولیت زیرین شکل گرفته‌اند.

قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان نامه مقطع دکتری نویسنده اول در دانشگاه شهید باهنر کرمان است، نویسندگان از دکتر محسن موذن که برای بهبود این مقاله کمک زیادی نمودند، بسیار سپاسگزارند. همچنین از آزمایشگاه EMS دانشگاه یاماگاتا و

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.8.4]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.295]

آزمایشگاه رنیشاو رامان دانشگاه وین برای کمک به تجزیه و تحلیل نتایج ریزپردازش الکترونی و ریز رامان تشکر می‌نماییم.

مراجع

[1] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J*., "An introduction to the Rock-forming minerals."*, The Mineralogical Society, London, (2013) 498 p.

[2] Reiche I., Pages-Camagna S., Lambacher L., "*Raman Spectrosc.*", 35 (2004), 719–725.

[3] Makreski, P., et al., *"Struct."*, (2005) 744–747, 79–92.

[4] Berberian M., King G.C.P., *"Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran."*, Can. J. Earth Sci. 18 (1981), 210–265.

[5] Aghanabati A., "*Geology of Iran.",* In: Geological Survey of Iran. (1995) pp. 606.

[6] Berberian M., *"Active tectonics and geologic setting of the iranian plateau.",* Dev. Earth Surf. Processes 17 (2014) 151–171.

[7] Mehdipour Ghazi J., Moazzen M., *"Geodynamic evolution of the Sanandaj–Sirjan zone, Zagros Orogen, Iran.",* Turkish J. Earth Sci. 24 (2015) 513–528.

[8] Förster H., Fesefeldt K., Kürsten M., *"Magmatic and orogenic evolution of thecentral Iranian volcanic belt."*, In: Armstrong, J.E., Hedberg, H.D. (Eds.), 24thInternational Geologic Congress. Montreal, Québec, Canada, (1972) pp. 198–210.

[9] Jung D., Küsten M., Tarkian M., *"Post-Mesozoic volcanism in Iran and itsrelation to the subduction of the Afro-Arabian under the Eurasian plate.",* In:Pilger, A., Rosler, A. (Eds.), Afar Between Continental and Oceanic Rifting. E.Schweizerbart'sche Verlag sbuchhandlung, Stuttgart (1976).

[10] Berberian F., et al., *"Late Cretaceous andearly Miocene Andean type plutonic activity in northern Makran and centralIran.",* J. Geol. Soc. London 139 (1982) 605–614.

[11] Ahmad T., Posht Kuhi M., *"Geochemistry and petrogenesis of Urumiah–Dokhtar volcanic belt around Nain and Rafsanjan Area; A Preliminary Study: Treatise on the Geology of Iran."*, Iranian Ministry of Mines and Metals (1993).

[12] Alavi M., "*Regional stratigraphy of the Zagros folded-thrust belt of Iran andits proforeland evolution."*, Am. J. Sci. 304 (2004) 1–20.

[13] Sengo¨r A.M.C., "*The Cimmeride orogenic system and tectonics of Eurasia.Bull.",* Geol. Soc. Am. 195 (1984) 1–74.

[14] Mohajjel M., Fergusson C.L., Sahandi M.R., *"Cretaceous-Tertiary convergenceand continental collision.",* Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. J. Asian Earth Sci. 21(2003) 397–412.

[15] Moazzen M., et al., *"Azna granitoid as anexample of syn-collision S-type granitisation in Sanandaj-Sirjan metamorphicbelt Iran.",* Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte 11 (2004) 489–507.

[16] Berberian M., Alavi-Tehrani M., *"Structural analysis of the Hamadanmetamorphic tectonites; a paleotectonic discussion.",* In: Berberian, M. (Ed.), Contribution to the Seismotectonics of Iran, Part III, 40. Geological MineralogySurvey of Iran, (1977) pp. 263–280.

[17] Ghasemi H., et al., *"The mafic ultramafic complex of Sikhoran (central Iran); a polygenetic ophiolite complex.",* CR Geosci. 334 (2002) 431–438.

[18] Rahimi Sadegh H., Moeinzadeh H., Nakashima K., *"Geochemistry, mineral chemistry and P-T evaluation of metasediments of Bahram-Gur complex, ES Sanandaj-Sirjan zone, Iran.",* Mineralogia 50 (2019) No 1-4: 34-68.

[19] Sabzehi M., *"Geological map of GolGohar.",* 1/100000. Geological Survey of Iran (1997).

[20] Horton B.K., et al., *"Detrital zircon provenance of Neoproterozoic to Cenozoic deposits in Iran: implications for chronostratigraphy and collisional tectonics.",* Tectonophysics 451 (2008) (1-4), 97-122.

[21] Miyamoto M., Ohsumi K., *"Micro-Raman spectroscopy of olivines in L6 chondrites: evaluation of the degree of shock.",* Geophys. Res. Lett. 22 (1995) 437–440.

[22] Whitney D.L., Evans B.W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist.",* 95 (2010) 185-187.

[23] Passchier C. W., Trouw R. A. J., *"Microtectonics.",* Springer verlag, Second edition, (2005) 366 p, 322 illus.

[24] Barker A.J., *"Metamorphic textures and microstructures.",* Blackie, Glasgow (1990).

[25] Winkler H.G. F., *"Petrogenesis of metamorphic rocks."*, Shiraz University Press, (1992) 408 p.

[26] Bukher K., Frey M., *"Petrogenesis of metamorphic rocks.",* University of Tehran, (2000) 404 p.

[27] Mange M.A., Morton A.C., *"Geochemistry of heavy minerals.",* Dev. Sedimentol. 58 (2007) 345–391.

[28] Koningstein J., Sonnich Mortensen O., *"Laser-excited phonon Raman spectrum of garnets.",* JMol Spectrosc, 27 (1968) 343-350.

[29] McDevitt N.T., *"Infrared lattice spectra of rare-earth aluminum, gallium, andiron garnets.",* J OptSocAm 59, 9 (1969) 1240-1244.

[30] Moore R.K, White W.B., Long T.V., *"Vibrational spectra of the common silicates: I. the garnets.",* Am Mineral 56 (1971) 54±71.

[31] Hofmeister A.M., Chopelas A., "Vibrational spectroscopy of end-member silicate garnets.", Phys Chem Minerals17 (1991a) 503-526.

[32] Pinet M., Smith Schweiz D.C., *"Mineral.",* Petrogr.Mitt. (Bull. Suisse) 73 (1) (1993) 21–40.

[33] Pinet M., Smith Schweiz D.C., *"Mineral,",* Petrogr.Mitt. (Bull. Suisse) 74 (2) (1994) 161–179.

[34] Smith Schweiz D.C., *"Spectrochim.",* Acta A, 61 (2005) 2299–2314.

[35] Smith Schweiz D.C., *"Acta Universitatis Carolinae.",* Geologica 46 (2002) 87–89.

[36] Smith Schweiz D.C., Pinet M., Boyer H., *"Terra Cognita.",* 8 (1998) 77–78.

[37] Smith Schweiz D.C., Pinet M., *"GeoRaman-96, Terra Abstracts.",* Supplement 2, Terra Nova 8 (1996) 23-24.

[38] Kolesov B.A., Geiger C.A., *"Raman spectra of silicate garnets.",* Physics and Chemistry of Minerals, 25 (1998)142-151.

[39] Werner C., *"Saxonian granulites-igneous or lithogenous. A contribution to the geochemical diagnosis of the original rocks in high-metamorphic complexes. Contributions to the geology of the Saxonian granulite massif (Sächsisches Granulitgebirge).",* Zfl-Mitteilungen, 133 (1987) 221-250.

[40] Garcia D., Fonteilles M., Moutte J., *"Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr and the genesis of strongly peraluminous granites.",* The Journal of Geology, 102(4) (1994) 411-422.

[41] Bhatia M.R., Crook K.W., *"Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins.",* Contributions to Mineralogy and Petrology, 92 (1986) 181-193.

[42] Alavi M., *"Tectonics of the Zagros orogenic belts of iran: new data and interpretation. Tectonophysics.",* 229 (1994) 211-238.**Error! Hyperlink reference not valid.**

[43] Mohajjel M., Fergusson C.L., *"Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran.",* International Geology Review, 56 (2014) 263-287.

[44] Berberian F., Berberian M., *"Tectono-plutonic episodes in Iran. In: Gupta,H.K., Delany, F.M. (Eds.), Zagros-Hindu Kush-Himalaya.",* Geodynamic Evolution,3. American Geophysics Union, Geodynamics Series, (1981) pp. 5–32.

[45] Hooper R.J., et al., "*The development of the southern Tethyan margin in Iran after the breakup of Gondwana: implications of the Zagros*

hydrocarbon province.", Geosciences 4 (1994) 72-85.

[46] Mingsheng P., et al., "*Raman Spectroscopy of Garnet-group Minerals.",* Chinese Journal of Geochemistry, Vol. 13 No.2 (1994).

[47] Henderson R.R., *"Determining chemical composition of the silicate garnets using Raman spectroscopy.",* Prepublication Manuscript, University of Arizona (2009).

[48] Sherwood P. M. A., *"Vibrational spectroscopy of solids.",* Cambridge University Press, Cambridge (1972).